

LNG 液化工厂液化率计算实践及探讨

侯志勇

安瑞科(廊坊)能源装备集成有限公司, 河北 廊坊 065001

摘 要:液化率是衡量 LNG 液化工厂运行效果的一个重要指标。由于很多装置缺少直接计量原料气和液化产品的方法,如何计算不同流程 LNG 液化工厂的液化率是一个难题。较详细阐述了利用调压计量橇原料气流量计量和液体贮槽产品液位计量参数,进行整个液化工厂液化率的间接计算实践,并对液化率计算结果影响因素进行了分析和探讨。此计算方法能够基本满足液化工厂液化能力的评估需求,为相关液化工厂液化率计算提供参考借鉴。

关键词:液化率;计算实践;液化工厂

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.05.005

0 前言

LNG 液化工厂主要目的是将气态天然气液化成 LNG 液体,方便贮存和运输。LNG 液化率是指液体产品量与原料气量的比值,是评价装置液化效果的一个重要指标。

安瑞科(廊坊)能源装备集成有限公司以 EPC 方式承建的曲沃 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 液化工厂项目,原料气来源于 2.8~3.5 MPa 管道煤层气,采用较为先进的 MDEA 工艺脱酸、分子筛吸附工艺脱水、混合制冷工艺,配套 2 台 100 m^3 、0.8 MPa 真空绝热压力贮槽贮存 LNG 产品,装置橇装化、配置、自动化、能耗、设备布置等方面的设计、建设独具匠心,2014 年 8 月投产以来,产量和能耗等各项指标达到/超过了考核标准,运行效果好,项目取得了圆满成功。

1 实际液化率计算

不同于理论计算过程中的液化率概念计算,实际液化工厂由于流程不同,计量装置不同,各装置液化率计算方法也各不相同。最直接的方法是计算出冷箱的液体产品量与进冷箱的原料气量比值。考虑合理配置计量装置和成本问题,液化率计算通常需要采用间接方法。

安瑞科(廊坊)能源装备集成有限公司曲沃 LNG 液化工厂项目在运行效果验证时,也涉及到液化率计算问题,在计算实践中,针对设备流程和计量配置情况,甲乙双方在间接测量和计算方法上,做了一些创新实践,较好地解决了液化率计算的问题。

2 原料气计量

2.1 原料气计量方法

在调压计量橇进口配置原料气蜗轮流量计。气体蜗轮流量计是速度式仪表,精度较高,重复性较好,能进行温度、压力、压缩因子自动补偿。选用的流量计量程 $0 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,精确度可达 $\pm 1.0\% R$,重复性可达 $0.05\% \sim 0.2\% R$,测量结果能远传到中控室。

2.2 对原料气计量方法的说明

1) 流量计系数补偿和工况显示状态是可以调整的:蜗轮流量计设置包括补偿系数单位、阻尼时间、温度补偿、压力补偿等设置。

设置系数补偿单位为次/ m^3 时,显示累积流量单位为 m^3 ,瞬时流量单位为 m^3/h ;设置系数补偿单位为次/L 时,显示累积流量单位为 L 或 m^3 ,对应的瞬时流量单位可以为 L/h、 m^3/h 或 L/min;

2) 原料气计量要确认好流量计的指示值状态。一

收稿日期:2015-03-19

作者简介:侯志勇(1969-),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要从事天然气液化装置成套研究、设计与调试工作。

般有标准状态 ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.013\ 25\times 10^5\text{ Pa}$) 和工程状态 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.013\ 25\times 10^5\text{ Pa}$), 两者示值相差约 1.07 倍^[1]。

当设定标况显示时, 瞬时量、日累积量、总量均为标况量; 设定工况显示时, 瞬时量、日累积量、总量均为工况量。

3 液体产品计量

3.1 贮槽液体产量测量方法

出冷箱液体产量未设置直接计量, 将产品液体贮槽中液体变化量作为液体产量。

贮槽液体变化量通过贮槽液位计量推算得到。

3.2 贮槽液位计量方法

贮槽液位测量是影响液化率计算精度的一个重要因素。贮槽 LNG 液位计量采用 CYJ-1 型弹簧差压计。CYJ-1 型差压计精度等级 2.5 级; 公称压力 4 MPa; 测量范围 0~100 kPa; 差压关系用毫米水柱 (mmWC) 或千帕 (kPa) 表示。

在高压波纹管外端连接有温度补偿装置, 使之在工作温度范围内差压计读值温度漂移极小。

3.3 贮槽液位、容积与重量对照表

100 m³ LNG 立式低温液体贮槽标牌提供有液位、容积与重量对照表, 见表 1。

表 1 LNG 贮槽液位、容积与重量对照表

液位 /(mm H ₂ O)	液化天然气 LNG	
	容积 /L	重量 /kg
0	0	0
100	386	181
200	1 383	650
300	2 749	1 292
400	4 247	1 996
500	5 750	2 703
600	7 254	3 409
700	8 757	4 116
...	...	...
6 600	97 463	45 808
6 700	98 966	46 514
6 767	100 000	47 000

表 2 液化率计算实践

原料气流量计算			液体 LNG 产量计算					液化率 / (%)
原料气流量 12 h 累计 /m ³	原料气处理流量 / (m ³ · h ⁻¹)	原料气 CH ₄ 摩 尔含量 /(%)	A 罐液位增 量 /(mmH ₂ O)	A 罐 LNG 液体增量 /t	B 罐液位增 量 /(mmH ₂ O)	B 罐 LNG 液体增量 /t	LNG 产 量 /t	
28 361	2 363(超 13.41 %)	98.58	2 178	15.37	409	2.89	18.26	90.70
27 676	2 306(超 10.65 %)	98.58	13	0.09	2 612	18.4	18.55	94.4
28 329	2 360(超 13.24 %)	98.58	1 003	7.1	1 650	11.66	18.74	93.20

贮槽标牌对照表含表内容积及相对应的重量(按压力为 0 MPa 时的饱和状态计算), 液化天然气的密度取 470 kg/m³^[2]; 容器的内直径取 3 000 mm。

3.4 贮槽内 LNG 液体重量的计算

贮槽标牌给出的换算是点对点数据, 根据这种换算, 推算出贮槽液位和 LNG 液体重量换算的对应线性关系和计算公式。

贮槽液体重量 (t) = [(液位计测量的贮槽液位 mmH₂O - 贮槽圆锥底高度 300 mmH₂O) ÷ 1 000] × 贮槽圆柱体圆柱部分圆截面表面积 m² + 贮槽底部圆锥底液体重量 1.3 t。

计算公式说明:

- 1) 100 m³ 贮槽直径是 3 000 mm, 轴向截面积 7.065 m²;
- 2) 液位计实际输出的是压差信号, DCS 通过逻辑运算, 将压差信号换算成液位指示;
- 3) 贮槽液位计量也可以看作是用 mmH₂O 表示的重力单位, 这是液位测量换算到液体重量的关键概念, 1 m³ H₂O 容积相当于 1 t H₂O 重;
- 4) 贮槽液体计量要去掉贮槽容积不规则的椭圆封头底, 这个椭圆封头底与圆柱体积计算公式不一样, 需要另外计算;

由贮槽厂家标牌提供的 300 mmH₂O 液位对应的 LNG 重量是 1 292 kg, 认为是椭圆封头底的高度和对应重量, 计算中将这一部分作为常数取为 1.3 t;

计算液体产量, 即贮槽体积变化量时, 椭圆封头底一般一直充满液体, 计算时被抵消, 取值不会影响计算结果。

3.5 液体产量的获得

液体产量通过贮槽单位时间液体变化量获得。通过编辑 DCS 计算语言, 使贮槽在显示液位的同时能够显示对应的液体容积和重量, 装置操作人员, 每 12 h 记录 1 次液体液位, 每 12 h 液位差值对应的液体量, 就是装置 12 h 进入到产品贮槽的液体产量。

4 液化率计算方法

4.1 液化率计算实践

贮槽装置几个有代表性的液化率计算实践见表 2。

4.2 液化率计算说明

1) 相对于 $50\,000\text{ m}^3/\text{d}$ LNG 液化工厂的设计处理量 $2\,084\text{ m}^3/\text{h}$, 表 2 中的原料气处理流量分别超出设计值 13.41% 、 10.65% 、 13.24% ;

2) 原料气流量 12 h 累计量, 数据来源于原料气调压计量橇流量计的原始计量;

3) 原料气小时处理气量, 数据来源于 12 h 累计流量折算;

4) 原料气 CH_4 含量, 数据来源于分析结果;

5) A/B 罐液位增量, 数据来源于贮槽液位计量的原始计量, 12 h 计量时段的差值;

6) A/B 罐 LNG 液体增量, 数据来源于计算;

7) 贮槽液体增量 = 贮槽液体重量 12 h 计量时段的差值;

8) LNG 产液量, 数据来源于 A + B 罐 LNG 液体增量;

9) 液化率, 数据来源于本实践所推导的液化率计算公式。

液化率 = $(\text{LNG 产液量} \div 0.45 \times 625) \div (\text{原料气流量 } 12\text{ h 累计} \times \text{原料气 } \text{CH}_4 \text{ 含量})$ (1)

式中: 0.45 为 LNG 液体密度的取值, t/m^3 ; 625 为 LNG 液体体积折合成气体体积的取值, m^3/m^3 。LNG 液体密度取决于其组分, 资料显示通常在 $430 \sim 470\text{ kg}/\text{m}^3$, 某些情况下可高达 $520\text{ kg}/\text{m}^3$, 密度还是液体温度的函数。为了兼顾计算结果客观性和计算方便, 双方约定取值 0.45; 参考文献^[2]显示单位体积的 LNG 液体生产的气体体积(即气液比)约为 625 倍, 具体数据取决于 LNG 组分。为了兼顾计算结果的客观性和计算方便, 交易双方约定取值 625; 简化计算液体产品没有进行 CH_4 含量折算, 弥补进口到贮槽的泄漏、放散等部分原料气损失; 特别强调, 表 2 中原料气是煤层气, 有效成份主要是 CH_4 , 因此将液体产品 LNG 和原料气中的 CH_4 含量比值作为计算液化率依据。如果主要成分发生变化, 可根据情况做相应调整^[3]。

5 液化率计算思考和探讨

LNG 液化工厂液化率计算结果与很多因素有关系, 包括: 原料气组成、低沸点组分氮、氢等占比、液化系统制冷能力和效果、装置泄漏情况、装置跑冷损失、计量位置和计量精度、贮槽 BOG 排放、脱酸尾气排放量等。

5.1 流量计的设置

液化装置液化率计算用流量计的设置因装置不同而不同。液化率的直接计算, 至少需要 2 个流量计, 进冷箱气态天然气流量和出冷箱的产品液体流量, 以减少中间计算原理误差和取值误差。

整体考虑装置计量简便、经济等因素, 较少有如此针对性的配置, 导致在液化率计量时存在计量设置不足的实际困难, 需要通过间接测量来推导结果。

5.2 气量的计算

进口调压计量装置的原料气气量不能等同于被液化的原料气气量。调压计量橇计量的原料气与液化率定义计算所用到的原料气气量不完全一致, 只是一种变通情况下的替代值。此处计量的原料气量没有完全进入到液化工序。因为, 原料气经过脱酸橇时, CO_2 等酸性气体被吸附掉; 采用 MDEA 脱酸工艺时, 酸性尾气排放, 除了包含酸气成分, 还有 CH_4 等有效天然气成分。这部分 CH_4 损失量也是一个变量, 随工艺变化而波动, 不易计量; 原料气经过脱水橇时, 其中水分被吸附掉; 原料气进调压计量橇流量计后, 进冷箱之前, 一些法兰、焊缝、阀门等处存在或可能存在一些泄漏损失; H_2O 、 CO_2 等检测仪器分析过程的微量放空损失; 一些流程中还存在导热油炉燃料气消耗^[3-4]。

5.3 CH_4 含量波动

原料气中的 CH_4 含量一直处于波动中, 为简化计算, 取定值^[5-6]。

5.4 LNG 液体密度偏差

LNG 液体密度是一个变量, 取值 $0.45\text{ t}/\text{m}^3$ 是为了简化计算, 与实际液体密度可能有些微差距, 计算结果可能产生微偏差。

曲沃原料气组分分析, 由 HYSYS 软件计算, 组分不同, LNG 液体密度波动幅度较大, 见表 3。

表 3 HYSYS 软件计算不同组分 LNG 液体密度

组分	含量/(%)			
CH_4	98.95	98.2	98.95	98.66
N_2	0.76	0.87	0.77	0.89
CO_2	0.25	0.23	0.24	0.27
O_2	0.02	0.08	0.02	0.04
-145 °C, 0.3 MPa 时密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	400.2	400.6	400.0	400.4
-150 °C, 0.3 MPa 时密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	408.3	408.9	408.3	408.7
-155 °C, 0.3 MPa 时密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	416.2	416.8	416.2	416.7

5.5 其他计算方法

1) 可由产品液体重量 ÷ 原料气重量取得, 避免波动较大的 LNG 气液比取值。

进口原料气重量 = 进口原料气累积流量 $\text{m}^3/\text{h} \times 0.7174\text{ kg}/\text{m}^3 \times$ 原料气中 CH_4 摩尔含量; 其中标态 CH_4 密度取值或者天然气摩尔组分在 CH_4 98.95%, N_2 0.76%,

O_2 0.02 %, CO_2 0.25 % 时, HYSYS 计算软件计算密度是 0.7157 kg/m^3 , 相差不明显。

LNG 产品重量由前述计算得到。

原料气密度相对于 LNG 液体的气液比, 波动会稍微少一点; 或者可以根据进口流量测量状态和原料气组分, 通过 HYSYS 软件计算得到原料气密度。

2) 可以直接采用贮槽液位增量对应的液体体积, 不必通过重量转换, 可减少密度取值带来的误差。

5.6 贮槽液体增量少于冷箱液体产量

出冷箱进贮槽有一段管道距离, 不可避免地存在气化损失, 进到贮槽的液体量少于冷箱流出的产品量, 液化率计算结果低于实际值。

5.7 计量时间的影响

液化率产品计量时间段选得长一点, 相应会减少计量误差和记录人员记录时间误差对计算结果的影响。

5.8 液体充槽车的影响

如果贮槽对外充车, 液体充车量、充车过程汽化量的不确定性会干扰液化率计算结果。

5.9 BOG 排放的影响

贮槽 BOG 排放会减少液体产品量, 使液化率计算结果低于实际值。

5.10 气体组分的影响

天然气是多种气体的混合物, 计算液化率时应该指定以某种组分计, 通常以 CH_4 或其他主要成分计^[7-8]。

5.11 LNG 纯度的影响

产品 LNG 存在纯度问题, 如果做纯度分析, 结果会更靠近实际值。

6 结论

LNG 工厂液化率计算可以反映一些装置运行变化趋势, 有实际应用价值。虽然液化率计算在流程设置一定的情况下, 取值有所简化, 被测介质参数存在不确定性, 但液化率结果可以反应装置制冷系统运行效果的相对趋势, 验证流程设计、设备配置效果, 可以对操作、检修提供一定的指导。

LNG 工厂液化率计算从工艺设计之初考虑, 可以有设计考核目标、液化率计算约定。如果甲乙双方认为有必要在合同中约定考核液化率, 在要求考核标准的同时, 需明确

液化率具体计算方法、计算需要的原始数据、测量方法和精度、波动范围、原料气组分范围等前提条件。

参考文献:

- [1] 姜正侯. 燃气工程技术手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993: 658.
Jiang Zhenghou. Guide to Gas Engineering Technique[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1993: 658.
- [2] 严铭卿. 燃气工程设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Yan Mingqing. Guide to Gas Engineering Design[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 49-73.
Gu Anzhong. Guide to LNG Engineering Technique[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010: 49-73.
- [4] 顾安忠. 液化天然气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 10.
Gu Anzhong. Liquefaction Technology for Natural Gas[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003: 10.
- [5] 张林, 林文胜, 顾安忠, 等. 煤制天然气液化流程初步研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(2): 1-5.
Zhang Lin, Lin Wensheng, Gu Anzhong, et al. Preliminary Study on Liquefaction Process of Coal-based Natural Gas[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(2): 1-5.
- [6] 汪家铭, 蔡洁. 煤制天然气技术发展概况与市场前景[J]. 天然气化工, 2010, 35(1): 64-70.
Wang Jiaming, Cai Jie. Technology Development and Market Prospects of Coal-based Natural Gas[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2010, 35(1): 64-70.
- [7] 朱利凯, 陈赓良. 天然气处理与加工[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 59.
Zhu Likai, Chen Gengliang. Gas Treatment and Processing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 59.
- [8] 陈赓良, 朱利凯. 天然气处理与加工工艺原理及技术进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 19.
Chen Gengliang, Zhu Likai. Technology Development of Gas Treatment and Processing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 19.